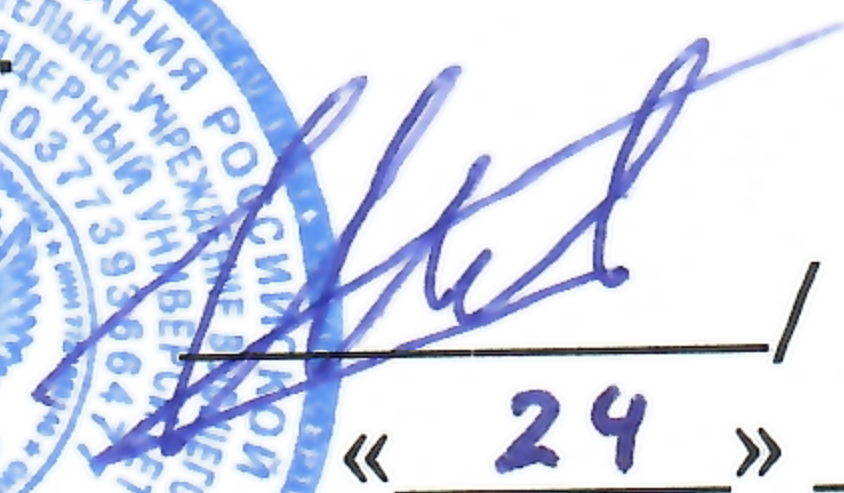


«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор НИЯУ МИФИ

д.ф.-м.н.



 / Шевченко В.И./  
« 24 » 04 2024 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Артеменко Ивана Игоревича  
«Ионизационная инициация каскадов, спиновые и радиационные  
эффекты в сильных лазерных и плазменных полях»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.9 «Физика плазмы»

Диссертационная работа И.И. Артеменко посвящена аналитическому и численному исследованию процесса ионизационной инициации квантово-электродинамических каскадов, а также спиновых и радиационных эффектов в сильных лазерных и плазменных полях.

**Актуальность диссертационной работы** И.И. Артеменко обусловлена значительным прогрессом в области лазерных технологий, достигнутым в последние несколько лет. Были построены и введены в эксплуатацию лазерные установки мощностью около 10 петаватт (SULF, КНР) и достигнута интенсивность в лазерного излучения  $\sim 10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup> (CoReLS, Республика Корея). Развиваются, в том числе в России, проекты, нацеленные на достижение еще больших, экзаваттных мощностей, что позволит проводить эксперименты по взаимодействию электромагнитного излучения с веществом при интенсивности  $\sim 10^{24}$  Вт/см<sup>2</sup> и выше. Взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем такой интенсивности в оптической и инфракрасной областях длин волн носит существенно нелинейный и даже непертурбативный характер и порождает широкий спектр эффектов классической и квантовой электродинамики (КЭД), экспериментальное исследование которых возможно отчасти уже сегодня, а в обозримом будущем должно широко развернуться по мере



введения в строй новых лазерных установок мульти-петаваттной мощности. В настоящее время основным направлением исследований в этой области физики является анализ и численное моделирование эффектов сильнополевой классической квантовой электродинамики в контексте возможных экспериментальных реализаций. К таким эффектам относятся, в частности, ускорение заряженных частиц в различных схемах лазерно-плазменного взаимодействия, генерация сверхсильных магнитных полей в плазме под воздействием лазерного поля, различные эффекты, связанные с проявлениями радиационного трения в классическом или квантовом режимах, генерация квантовых каскадов элементарных частиц, рождение заряженных частиц электромагнитным полем из вакуума. В частности, КЭД-каскады элементарных частиц в сильных лазерных полях интенсивно обсуждаются и исследуются теоретически с начала 2010-х годов. К настоящему времени по этой тематике опубликованы в ведущих физических журналах многие десятки работ, ряд основополагающих статей набрали за прошедшие 10-15 лет многие сотни цитирований. Экспериментальное наблюдение КЭД-каскадов возможно при интенсивностях  $>10^{25}$  Вт/см<sup>2</sup>, которые могут быть получены на масштабе ближайших одного-двух десятилетий. В этой связи в научном сообществе идет активное обсуждение возможных конфигураций взаимодействия для эффективной генерации КЭД-каскадов в условиях планируемых экспериментов. Таким образом, работа И.И. Артеменко, посвященная разработке задач, относящихся к очерченному выше кругу исследований, включая процесс ионизационной инициации КЭД-каскадов в поле двух лазерных импульсов, применимость ряда приближений, используемых при анализе радиационных эффектов в сильном лазерном поле, и влияние спиновых степеней свободы на динамику заряженных частиц в поле сверхсильного лазерного излучения, безусловно является актуальной и представляет интерес как для развития расчетно-теоретических методов физики сильных полей, так и свете будущих экспериментов.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация И.И. Артеменко состоит из введения, трех глав, заключения, списка публикаций по диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 143 страницы, включая 26 рисунков, 1 таблицу,



список литературы из 166 наименований на 17 страницах и список публикаций по диссертации из 12 наименований.

**Введение** посвящено обоснованию актуальности проведенных в диссертационной работе исследований, обзору результатов, полученных в данной области другими научными группами, формулировке целей работы, научной новизны, положений, выносимых на защиту, и краткому изложению содержания диссертации. Также приводятся данные о личном вкладе автора, достоверности результатов, апробации работы и количестве публикаций по теме диссертации.

В **первой главе** рассмотрено взаимодействие пучка электронов с лазерным полем, описываемое в приближении Фоккера-Планка, найдено такое магнитное поле, при взаимодействии электронов с которым, получаемое распределение частиц по энергиям совпадает со случаем взаимодействия аналогичных электронов с заданным лазерным полем. Такая замена лазерного поля на постоянное магнитное во многих задачах может существенно упростить теоретический и численный анализ. Также исследована задача об излучении электрона и мюона в постоянном магнитном поле с учетом поляризации вакуума. Показано, что влияние действительной части показателя преломления поляризованного вакуума на спектр излучения электрона в магнитном поле мало в области параметров, где справедливо использование теории возмущений. Продемонстрирована перспективность использования мюонов для исследования влияния действительной части показателя преломления поляризованного вакуума на параметры излучения.

Во **второй главе** исследовано формирование квантово-электродинамического (КЭД) каскада при взаимодействии двух линейно поляризованных лазерных импульсов с мишенью из инертных газов. Построена численная модель для описания полевой ионизации, учитывающая режим подавления барьера. Результаты численного моделирования, с использованием данной модели, подтверждают предположение о том, что более тяжелые газы лучше подходят в качестве затравки для инициации КЭД-каскада. Построена аналитическая модель КЭД-каскада во вращающемся электрическом поле. Выведено выражение для скорости роста КЭД-каскада. Полученное выражение находится в хорошем согласии с результатом численного



моделирования в широком диапазоне изменения напряженности лазерного поля.

**Третья глава** посвящена анализу движения электрона в постоянном магнитном поле с учетом радиационных эффектов и спиновых степеней свободы. Модель непрерывных радиационных потерь расширена на случай спиновых степеней свободы и исследована как в квазиклассическом, так и в существенно квантовом режиме. Показано, что времена, на которых данная модель применима, намного превышают как характерные времена диссипации энергии, так и времена, за которые формируется поляризация пучка электронов.

**Заключение** кратко резюмирует полученные в диссертационной работе результаты.

**Степень обоснованности, достоверности и новизны научных положений и результатов.** Результаты, полученные И.И. Артеменко в диссертационной работе, являются новыми, что подтверждается их публикацией в ведущих физических журналах, обеспечивающих высокий уровень рецензирования, и представлением на нескольких всероссийских конференциях и научных семинарах. Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается использованием широко известных и надежно апробированных методов классической и квантовой электродинамики сильных полей, включая как аналитические методы, так и численные коды, а также сравнением известными ранее результатами в тех областях параметров, в которых это сравнение возможно.

**В процессе изучения диссертационной работы и автореферата возникли следующие вопросы и замечания:**

1. В работе расчёты, сделанные с помощью PIC-кодов, используются при рассмотрении эффектов, в которых коллективные явления в плазме и, в частности, создаваемое плазмой поле не играют существенной роли и не учитываются. В качестве примеров можно привести вычисления в разделах 2.2 В и 3.2. В этих случаях расчеты можно было бы провести с использованием методов молекулярной динамики, гораздо менее затратных в вычислительном отношении.



2. В разделе 2.2 недостаточное внимание уделено обсуждению того факта, что величина эквивалентного магнитного поля зависит от формы огибающей лазерного импульса. Эта зависимость не исследована.
3. В разделе 2.3 никак не обсуждается влияние мнимой части вакуумного показателя преломления, которая имеет тот же порядок величины, что и вещественная часть.
4. В разделе 3.2 обсуждается развитие КЭД-каскадов, инициируемых электронами, рождающимися внутри фокуса в результате ионизации. При этом оказывается, что позитроны, появление которых свидетельствует о развитии каскада, наблюдаются даже в том случае, когда в качестве источника электронов используется гелий. Как можно объяснить этот результат на качественном уровне, ведь гелий должен полностью ионизироваться довольно быстро, при интенсивности около  $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>? При этом число позитронов в случае гелия оказывается всего примерно вдвое меньше, чем в случае ксенона, внутренние электроны которого ионизируются при существенно больших интенсивностях. Не связан ли этот результат с упрощенным модельным описанием лазерного импульса, интенсивность которого нарастает слишком быстро?

Перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа И.И. Артеменко представляет самостоятельное и завершённое исследование, выполненное на актуальную тему и на высоком профессиональном уровне. Автореферат полно отражает содержание диссертации. Работа отвечает всем требованиям к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Артеменко И.И. заслуживает, за вклад в исследование ионизационной инициации каскадов, спиновых и радиационных эффектов в сильных лазерных и плазменных полях, присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 «Физика плазмы».

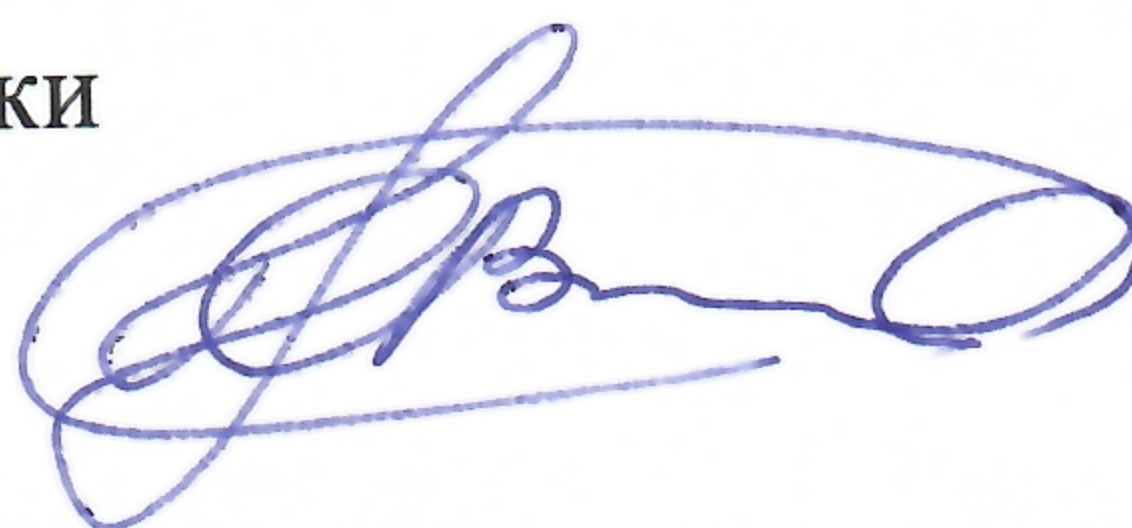


Диссертация Артеменко Ивана Игоревича и отзыв на нее заслушаны и одобрены на совместном семинаре кафедры теоретической ядерной физики и Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ (присутствовало на заседании 15 чел., результаты голосования: «за» - 15 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол №04/01 от 4 апреля 2024г.

Заведующий кафедрой

теоретической ядерной физики

НИЯУ МИФИ, д.ф-м.н.

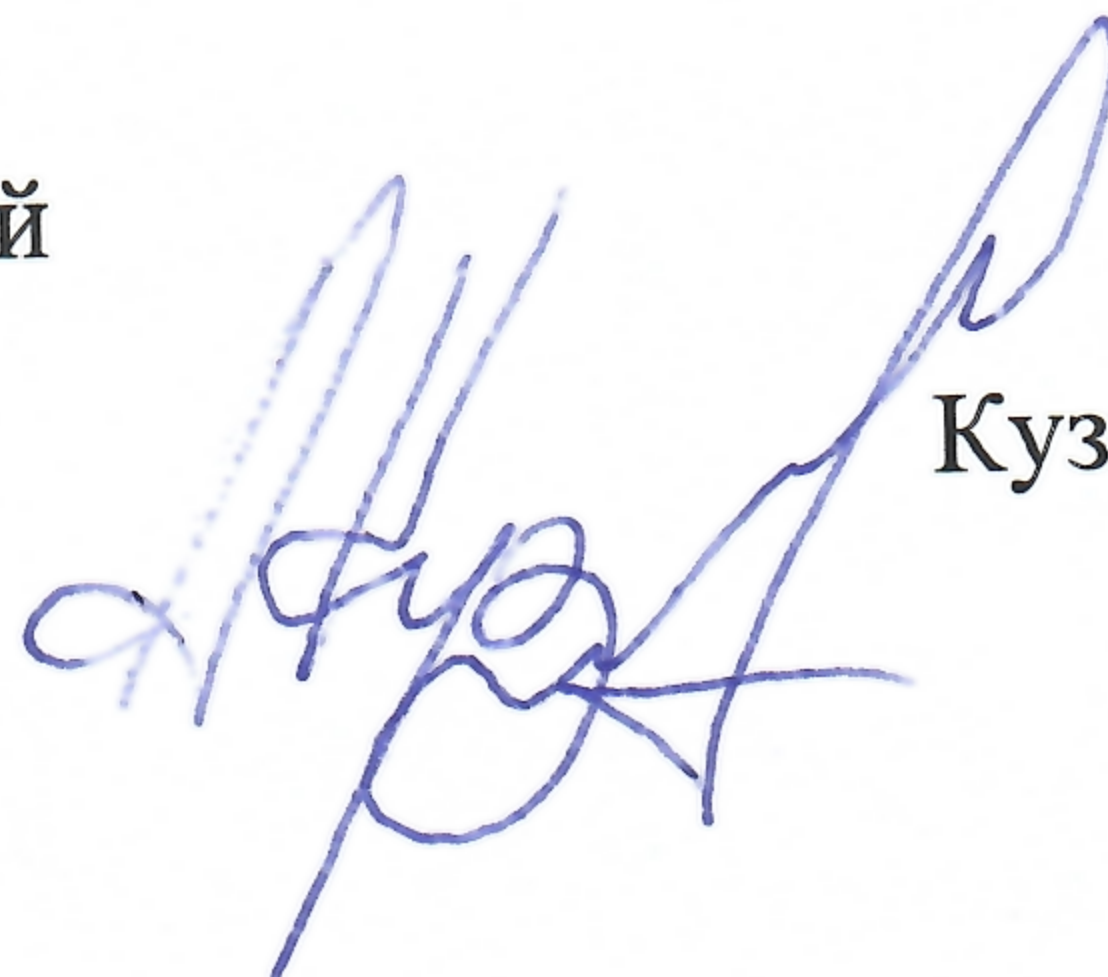


Попруженко С.В.

Директор института

лазерных и плазменных технологий

НИЯУ МИФИ, д.ф-м.н.



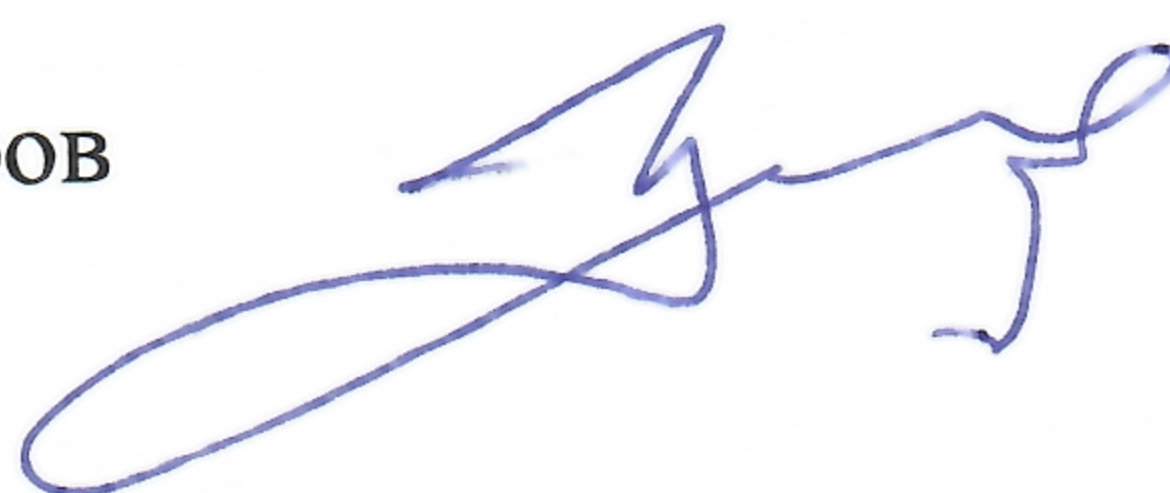
Кузнецов А.П.

Председатель совета

по аттестации и подготовке

научно-педагогических кадров

НИЯУ МИФИ, д.ф-м.н.



Кудряшов Н.А.